

高速車両中間車側面の圧力・流速測定

佐久間 豊*、 鈴木 昌弘*、 前田 達夫*

Measurement of Flow around a High Speed Train

by

Yutaka SAKUMA, Masahiro SUZUKI & Tatsuo MAEDA
Railway Technical Research Institute

ABSTRACT

Flow-induced vibration of high-speed trains becomes one of issues in recent years. It was noticed that the yawing vibration of the car in a tunnel section (cross section 63.4 m^2) was more noticeable than that in an open section. The pressure fluctuation on the sides of the high-speed train has been considered one of the causes of yawing vibrations, which may spoil riding comfort. Few experimental studies, however, have been conducted and little knowledge has been obtained. In this study, we measure unsteady pressure and velocity on the sides of the high-speed train (16 cars, length 400 m, cross section 10.2 m^2) to investigate the flow structure. The results indicate the existence of the large-scale structures such as vortices in the space between the train side and the tunnel wall.

Key Words : high-speed train, flow-induced vibration, unsteady flow

1. はじめに

近年、新幹線の速度向上にともない、車両の左右動揺が顕著となり、乗り心地の面から問題になりつつある。その現象の特徴は、トンネル区間の方が明かり区間（非トンネル区間）より揺れが大きく、また編成位置によりその程度が異なり、先頭車両から後尾車両にかけて動揺が増大することである。原因のひとつとして車両に働く空気力が考えられ、車両動揺と列車側面に働く空気力（圧力）との関係を調べているが[1]、車両まわりの流れのメカニズムは不明の点が多い。本報告では、トンネル(複線)を走行する車両の中間車側面位置で、圧力と流速を同時測定し流れの構造を調べた。

2. 測定方法

測定に用いた列車は全長 400 m、16 両編成であり、先頭から 13、14 両目（約 330 m）の中間車側面位置に、圧力計と 1 次元ホットフィルムプローブ、ピトー管を設置した（図 1 参照）。図中の

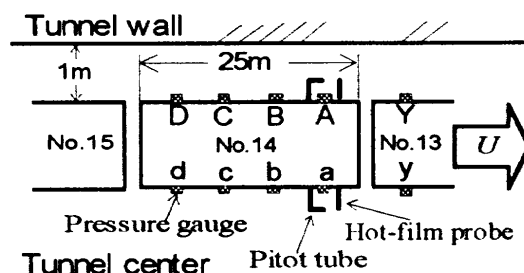


図 1 圧力および流速測定位置(上から)

記号は測点の位置を示す。流速は測点 A および a の 2 個所で測定した。列車は最高速度 300 km/h で走行する。

列車は複線の片側を走行するため、図 2 のようにトンネル内で偏った位置にある。ここでは、トンネル壁側に近い方の列車側面を「トンネル壁側」、反対側を「中央側」とする。

3. 結果と考察

3.1 速度分布および圧力と流速の関係

* 鉄道総合技術研究所

中間車側面の境界層底部の速度分布を図 3 に示す。実線は速度分布をべき乗則で表わした時の最小二乗近似曲線である。明かり区間では列車側面近傍で主流の約 50~60% に達していることが分かる。速度分布は、通常の平板乱流境界層分布とは異なっており、これは Crespi ら[2], 福西ら[3] の明かり区間での測定結果の傾向と一致している。また、明かり区間とトンネル区間で分布は異なり、トンネル区間ではトンネル壁側と中央側で異なっていることが分かる。

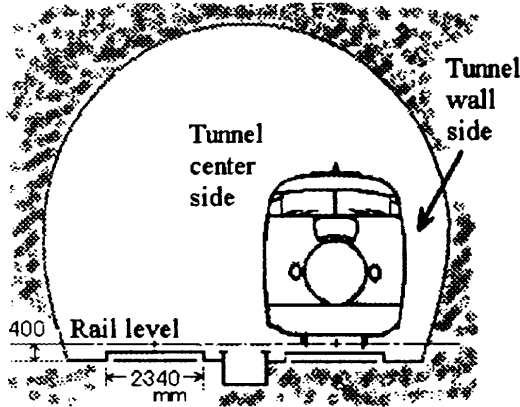


図 2 トンネル断面図

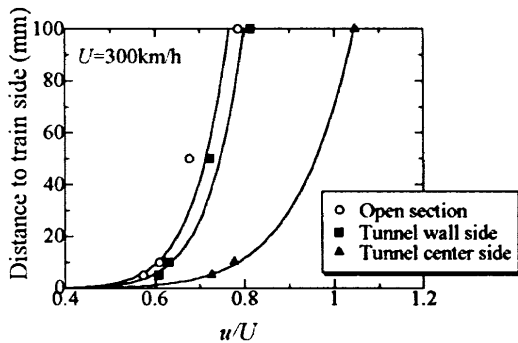


図 3 境界層底部の速度分布

図 4 に、中央側の測点 a、トンネル壁側の測点 A(図 1 参照)での圧力 p と流速 u の測定例を示す。以下図 9 まで、列車速度 $U = 300 \text{ km/h}$ 、流速計の列車側面からの距離 $L = 50 \text{ mm}$ の位置で測定した結果を示す。車両動揺の周波数帯(2~3 Hz)に注目するため、0.2~5.0 Hz のバンドパスフィルタをかけ高周波成分を除去した。左側の図が明かり区間を、右側の図がトンネル区間を示す。圧力、流速とも、明かり区間よりトンネル区間の方が変動が大きくなっている。トンネル区間では、中央側と比較して、トンネル壁側の方が振幅が大きくピークをはっきりしていることが分かる。また、トンネル壁側の圧力と流速のピークには対応関係が見られ、流速の上に凸のピークの直後に圧力の下に凸のピークがくる傾向にある。

図 5 に、測点 A での圧力と流速のパワースペクトルを示す。明かり区間では圧力、流速ともに目

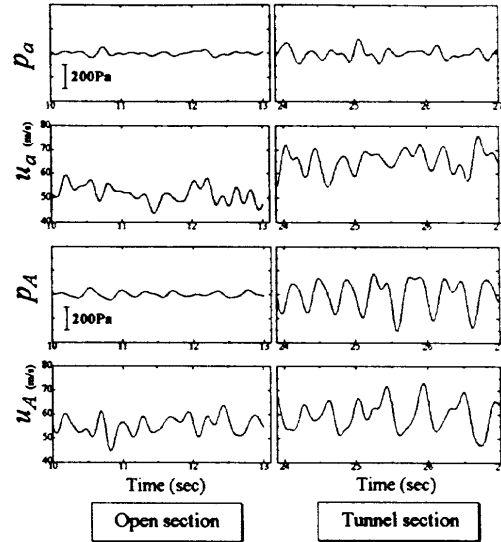


図 4 圧力と流速の測定波形例 ($U = 300 \text{ km/h}$, $L = 50 \text{ mm}$)

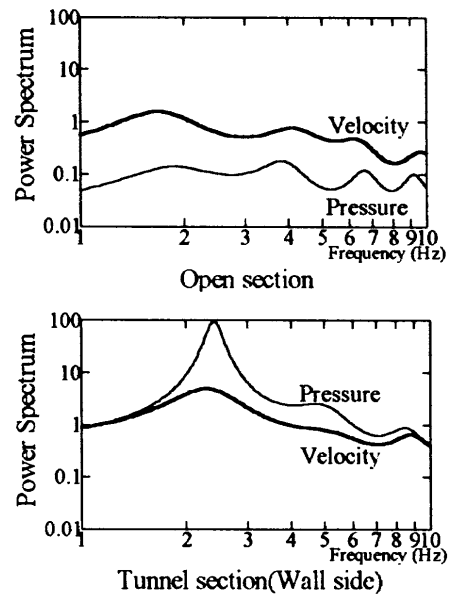


図 5 圧力と流速のパワースペクトル ($U = 300 \text{ km/h}$, $L = 50 \text{ mm}$)

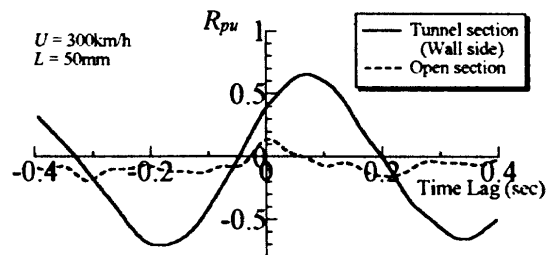


図 6 圧力と流速の相互相関 R_{pu}

立ったピークは存在しないが、トンネル区間の壁側では両者ともに 2.4 Hz 付近に卓越周波数が存

在し、特にトンネル壁側の圧力のパワースペクトルが、明かり区間に比べて非常に大きくなっている。

図6に、明かり区間とトンネル壁側の、変動圧力と流れ方向変動流速の相互相関を示す。明かり区間では時間遅れ0.0 sec付近にピークが認められるものの、非常に小さい。一方、トンネル区間のトンネル壁側では相関が高く、時間遅れ0.07 secに正のピークが、-0.19 sec付近に負のピークが存在する。これは、図4の測定波形例において、圧力と流速のピークが対応関係にあることを示している。

3.2 圧力変動と時空間相関

前節では、主に列車側面の一つの測点に絞って圧力と流速の関係を見てきた。ここでは、列車側面全体の空間的な流れの構造について述べる。

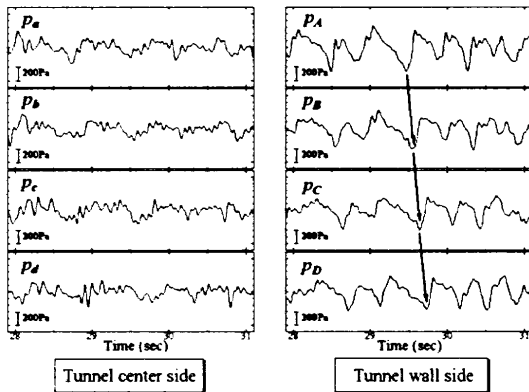


図7 トンネル区間の圧力測定波形例
($U = 300 \text{ km/h}$, $L = 50 \text{ mm}$)

図7は、トンネル区間走行時、中央側の測点a~d、トンネル壁側の測点A~Dの圧力測定結果である。トンネル壁側での圧力変動は中央側よりも振幅が大きく、下に凸の鋭いピークを持つ特徴的な波形であり、図中矢印のように、測点AからDの方向へ移動している。

圧力変動の時空間相関を図8に示す。相関は圧力計間の距離が大きくなるしたがって、中央側では急速に減少するが、トンネル壁側では係数0.8以上の値を保っている。これはトンネル壁側での圧力変動が図7のように、あるパターンを維持しながら伝ばしていることを表す。時空間相関の時間差から圧力変動パターンの伝ば速度を計算すると、列車速度の約80%で移動している。

図9に、トンネル壁側の測点YからA、中央側の測点yからaの側面圧力の相互相関を示す。明かり区間およびトンネル中央側と比較し、トンネル壁側では相関が高く、異なる車両間の連結部を超えて規則的な圧力変動パターンが伝わっていることが分かる。

トンネル壁側で各相関が非常に良いこと、および相関の時間差から、トンネル壁面と列車側面間

の空間に、渦などの大規模な流れの構造の存在が推測される。

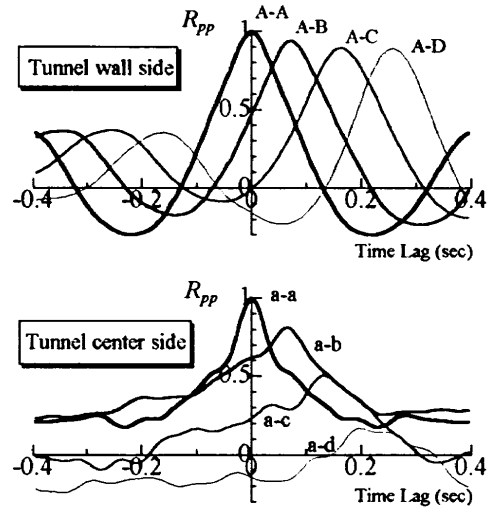


図8 圧力変動の時空間相関 R_{pp}
($U = 300 \text{ km/h}$, $L = 50 \text{ mm}$)

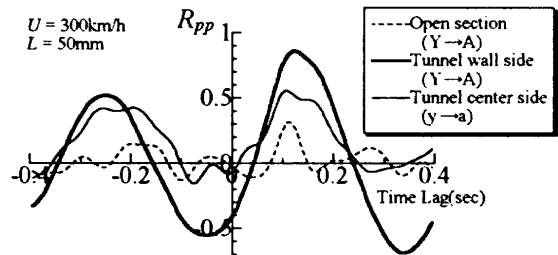


図9 車両側面圧力(異なる車両)の相互相関 R_{pp}

図8の圧力変動の移動速度 $V = 66 \text{ m/s}$ および図5のパワースペクトルのピーク周波数 $f = 2.4 \text{ Hz}$ から、圧力パターンの変動の間隔 λ は $\lambda = V/f$ より約27.5 mの間隔で変動していることが分かる。一車両長さは25 mであり、圧力変動の波長は比較的この値に近い。車両間の連結部には凹形の段差があり、このギャップが流れの大規模構造の発生原因の一つであることも予想される。

高速編成列車まわりの流れの特徴として、通常の風洞実験に比較してレイノルズ数が非常に大きく ($\sim 10^9$)、また、トンネル内走行時、列車長に比較して、列車側面とトンネル壁面間は狭く、両者は高速度 ($\sim 83 \text{ m/s}$) で相対運動している。ゆえにトンネル壁側では、強いせん断流れの状態にあり、渦など流れの大規模構造が発生しやすい条件にあると考えられる。

4. まとめ

側面変動圧力の時空間相関等の結果から、列車が高速でトンネル内を走行する時、トンネル壁と列車側面間の空間に、渦などの大規模な流れの構造が存在することが分かった。今後の課題として、

① 2次元流速の測定、②風洞実験、数値シミュレーションによるトンネル壁側のせん断流の解析、③既得データの更なる解析等により、大規模な流れの構造の特定と、発生原因の解明をおこなっていく予定である。なお、列車の左右振動加速度は乗り心地を決める重要な要素であるが、現在の営業時の走行状態では、特に問題の無いレベルであることを付け加えておく。最後に、測定に際しての JR 西日本の御協力に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 石原ほか 3 名、機械学会第 5 回交通・物流部門大会講演論文集、(1996)、123-126.
- [2] P.Crespi, R.Grégoire and P.Vinson, The Proc.of the World Congress on Railway Research '94. 2 (1994), 767.
- [3] 福西ほか 5 名、第 23 回乱流シンポジウム講演論文集、(1991)、120-131